

А. Н. ИВАНОВ, В. Е. КИРЕЕНКОВ, М. Д. НОСОВА

ДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены дифракционные методы, позволяющие определить линейные и угловые перемещения объекта. Для измерения угловых перемещений используется способ наведения на точки инверсии фазы дифракционной картины, что позволяет увеличить чувствительность измерений до $0,05''$.

Ключевые слова: дифракция, фаза, измерение.

Введение. Развитие современных технологий требует значительного увеличения точности при измерениях малых линейных и угловых перемещений. Как показывает практика, для измерения таких перемещений целесообразно использовать бесконтактные оптические методы, обладающие высокой чувствительностью, точностью и скоростью измерений. Основу оптических методов составляют явления автоколлимации, интерференции и дифракции [1—3]. Сравнительный анализ этих методов показал, что весьма перспективным направлением является применение дифракционных схем контроля, которые обладают высокой точностью при относительно простых способах их реализации. К недостаткам таких схем можно отнести сложность математической модели, описывающей их работу, что не позволяет учесть факторы, влияющие на точность контроля.

Дифракционный метод угловых измерений. Сравнительный анализ дифракционных методов контроля показал, что для проведения угловых измерений перспективно использование метода двойной дифракции на щели [4]. Достоинство этого метода заключается в увеличении точности измерения до $0,1''$ для диапазона измерения угловых перемещений, равного $\pm 1'$.

Метод двойной дифракции основан на возможности с высокой точностью определить координаты точек минимумов дифракционной картины, формируемой щелью, используя факт изменения в них знака фазы сигнала. Если совместить с точкой минимума центр второй щели, то в дифракционной картине Френеля за ней возникает характерное распределение интенсивности, по которому можно оценить величину несовпадения центра щели с точкой минимума.

Измерение угловых перемещений методом двойной дифракции может быть выполнено с помощью схемы, приведенной на рис. 1. Лазерный пучок от источника 5 направляется светоделителем 1 на щель 2 шириной a и, отражаясь от зеркала 3, установленного на расстоянии l от щели и жестко связанного с объектом измерения, вторично дифрагирует на щели. На приемнике 4 формируется измерительный сигнал, зависящий от углового положения зеркала 3. Распределение амплитуды отраженного пучка в плоскости щели описывается выражением (при условии, что $l > a^2 / \lambda$)

$$U(x) = \text{sinc}(kax / 4l), \quad (1)$$

где k — волновое число, x — координата в плоскости щели.

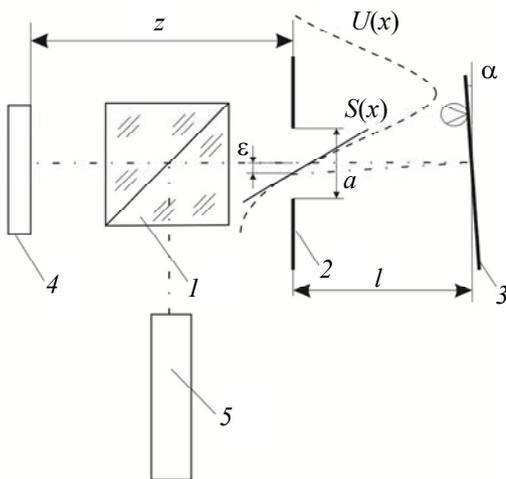


Рис. 1

В окрестности точки минимума, где $U(x) = 0$, можно, разложив выражение (1) в ряд Тейлора, получить в первом приближении линейную зависимость

$$S(x) = ax / 2Nl, \tag{2}$$

где N — порядок минимума.

При совмещении центра щели с минимумом порядка N первичной дифракционной картины распределение интенсивности сигнала на приемнике, установленном за щелью на расстоянии z в области дифракции Френеля, может быть определено из выражений

$$I(x_1) = U(x_1)\overline{U(x_1)}; \\ U(x_1) = \left(\exp(ikz) / \sqrt{i\lambda z} \right) \int_{-a/2}^{a/2} S(x) \exp((ik(x_1 - x)^2 / 2z) dx, \tag{3}$$

где $\overline{U(x_1)}$ — комплексно-сопряженная функция, x_1 — координата в плоскости приемника.

Совместить точку минимума с центром щели можно направив излучение лазера на щель под углом $\varphi = \arctg(N\lambda / a)$, либо перемещая саму щель по координате x (при дифракции Фраунгофера дифракционная картина инвариантна смещению щели). Дифракционная картина Френеля в этом случае содержит два главных максимума, симметричные относительно центра щели (рис. 2).

Если развернуть зеркало на угол α , то точка минимума сместится относительно центра щели на расстояние $\varepsilon \approx 2l\alpha$. Тогда выражение (3) принимает вид

$$U(x_1) = \left(\exp(ikz) / \sqrt{i\lambda z} \right) \int_{-a/2}^{a/2} S(x + \varepsilon) \exp((ik(x_1 - x)^2 / 2z) dx, \tag{4}$$

и в дифракционной картине происходит перераспределение интенсивности сигнала в ее главных максимумах (см. рис. 2). По разности интенсивностей можно определить смещение ε , так как $\Delta I = (I_2 - I_1) / I_0 = f(\varepsilon)$.

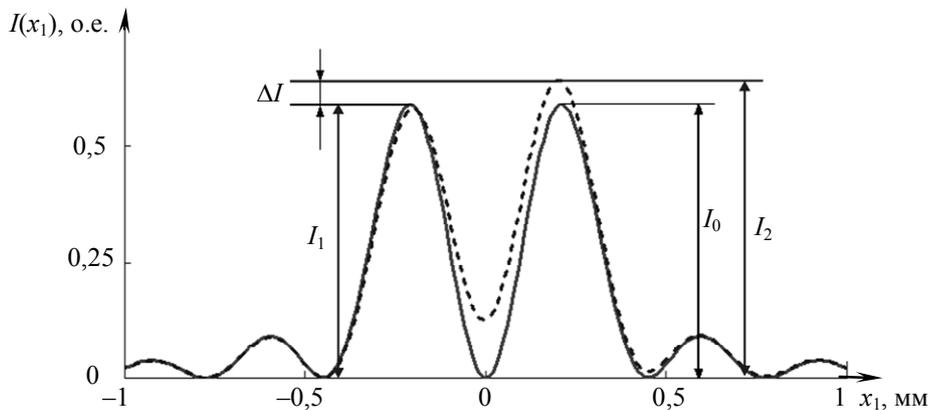


Рис. 2

Численное моделирование работы устройства, реализующего измерительную схему, при $a = 0,1$ мм, $\lambda = 0,632$ мкм, $l = 50$ мм и различных значениях z позволило получить функцию, описывающую зависимость перераспределения интенсивности на фотоприемнике от величины смещения ε точки минимума: $\Psi(z) = \delta(\Delta I(\varepsilon, z)) / \delta\varepsilon$, согласно которой эта функция возрастает с уменьшением z . Линейная область работы измерительной схемы: $\varepsilon \approx \pm a / 4 = \pm 0,025$ мм (нелинейность на краю диапазона ≈ 1 %), угловая: $\pm a / 8l = \pm 2,5 \cdot 10^{-4} \approx \pm 50''$. При $z = 20$ мм функция $\Psi(z) = 26,5$, и тогда при разрешении приемника $\Delta I = 0,002$ угловое разрешение измерителя будет $\Delta\alpha = \Delta I / 2\Psi l = 0,75 \cdot 10^{-6} = 0,15''$; при уменьшении z до 10 мм и увеличении l до 120 мм разрешение может быть увеличено до $0,05''$.

Дифракционный метод измерения расстояний. В работе [5] описываются варианты построения схем дальномеров дифракционного типа, базирующиеся на когерентно-оптическом методе формирования параллактического треугольника. Анализ погрешности измерения расстояния z от выходной щели дифракционного измерителя до контролируемого объекта показывает, что основные ее составляющие — это погрешность измерения расстояния между характерными точками дифракционной картины и погрешность задания ширины дифракционной марки (щели): $\delta z/z = \delta X/X + \delta a/a$. Погрешность $\delta X/X$ может быть уменьшена до 0,02 % при использовании соответствующего алгоритма обработки дифракционной картины [4, 6]. Уменьшение погрешности $\delta a/a$ до значения, меньшего чем 0,2 %, сопряжено с большими трудностями. В этой связи была разработана схема дифракционного измерителя расстояний, позволяющая устранить влияние погрешности $\delta a/a$ на погрешность δz .

Предлагается способ регистрации фотоприемником 3 двух дифракционных картин на щели 2 шириной a при ее исходном положении и смещении на величину Δ в направлении распространения лазерного излучения от источника 1 (рис. 3). Если X_1 и X_2 — расстояния между минимумами одного порядка для этих дифракционных картин, то расстояния z_1 и $z_2 = z_1 - \Delta$ могут быть выражены отношением

$$X_1/z_1 = X_2/z_2 = X_2/(z_1 - \Delta), \quad (5)$$

отсюда расстояние z_1 определяется как

$$z_1 = X_1 \Delta / (X_1 - X_2). \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что погрешность измерения $\delta z_1/z \approx \delta \Delta/\Delta$.

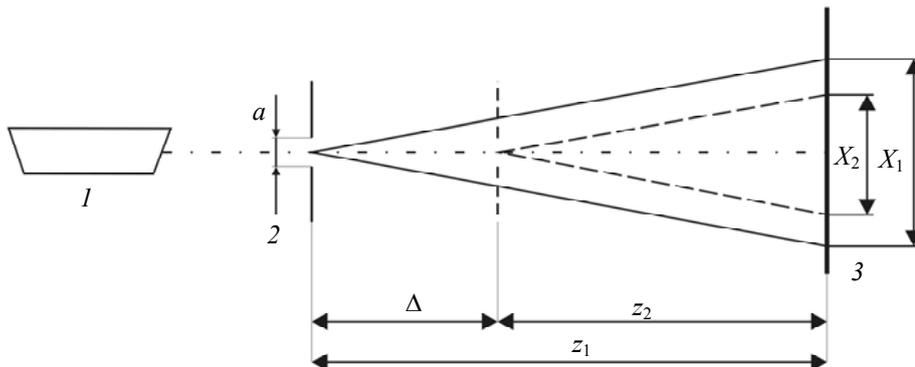


Рис. 3

Современные линейные трансляторы NANO позволяют перемещать объект на расстояние до 100 мм с предельной погрешностью не выше 0,5 мкм, что обеспечивает минимизацию влияния погрешности перемещения щели до 0,0005 %.

Экспериментальные исследования. Для экспериментальной проверки принципа работы дифракционного углового измерителя был собран макет на базе оптической скамьи ОСК-2 при следующих параметрах измерителя: $l=60$ мм, $a=0,2$ мм, $z=60$ мм, $\lambda=0,632$ мкм. В качестве приемника использовалась ПЗС-камера ЭВС VEI-535 с разрешением 1280×960 пкс и диагональю $1/2''$. Для поворота зеркала был применен клиновинтовой механизм с чувствительностью порядка $0,005'$. Численная модель дифракционной картины при $\varepsilon=0$ и экспериментально полученные дифракционные картины при $\alpha=0$ и α , равном $0,25'$ и $0,5'$, приведены на рис. 4, $a—z$ соответственно.

Макет установки для измерения положения объекта также был собран на базе оптической скамьи. Спектральная щель с шагом раскрытия 1 мкм устанавливалась на линейный

транслятор и перемещалась на 100 мм с предельной погрешностью 10 мкм, что обеспечивало предельную погрешность $\delta\Delta/\Delta$, сопоставимую с погрешностью $\delta X/X$. Объектом, до которого измерялось расстояние, служил ПЗС-приемник VEI-535.

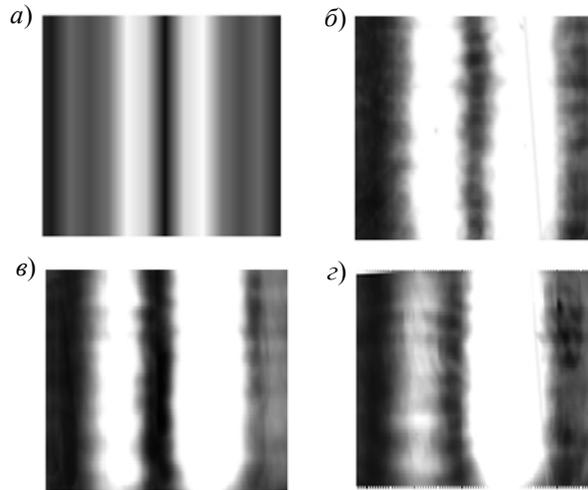


Рис. 4

Дифракционные картины регистрировались в области порядков минимума $N > 5$, расстояние X измерялось как $X = 4T$, где T — период дифракционных полос. Для более точного измерения X был применен метод наименьших квадратов. Сечения дифракционных картин приведены на рис. 5. Экспериментально полученное значение расстояния z_1 составило 603,5 мм при начально заданном $z_1 = 600$ мм.

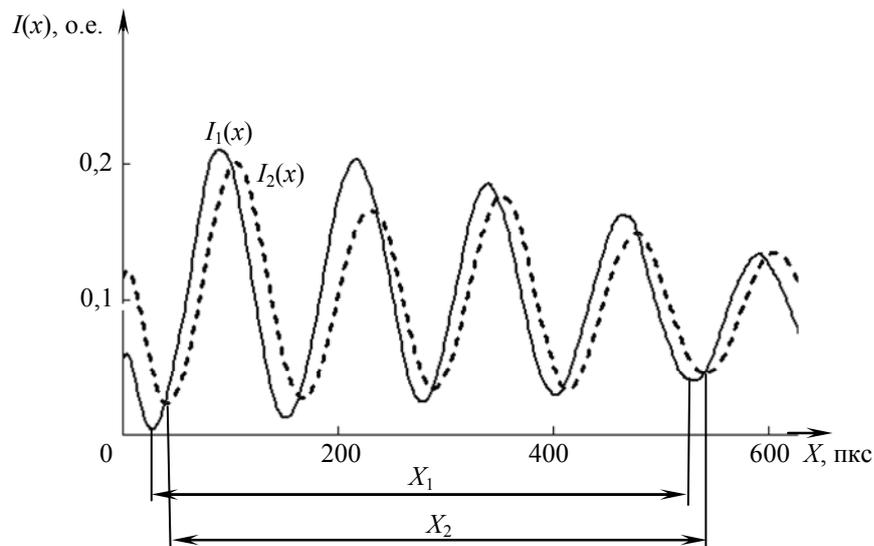


Рис. 5

Заключение. Использование предложенных дифракционных методов контроля линейных и угловых величин позволяет добиться увеличения чувствительности и точности измерений при относительно несложной измерительной схеме. Изменяя конструктивные параметры измерителя, можно в широких пределах изменять диапазон и точность измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникст Д. А., Константинович К. М., Меськин И. В. и др. Высокоточные угловые измерения. М.: Машиностроение, 1987.
2. Кортаев В. В., Прокофьев А. В., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные преобразователи угловых и линейных перемещений: Учеб. пособие. СПб: СПбНИУ ИТМО, 2012. Ч. 1.

3. *Козыцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю. М.* Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений // Фотоника. 2011. Т. 25, № 1. С. 16—19.
4. *Линьков А. Е., Назаров В. Н.* Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69. № 2. С. 76—81.
5. *Назаров В. Н.* Исследование оптической системы обработки информации $[\hat{F} - \hat{\Phi}]$ для дифракционных измерений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИТМО, 1978.
6. *Иванов А. Н.* Контроль геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционной картины Фраунгофера // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 49—53.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: i_off@mail.ru
- Валерий Евгеньевич Киреев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Марьяна Дмитриевна Носова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: crazygirl1703@gmail.com

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
07.02.13 г.